

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИКИ

В данной статье представлен полный цикл разработки методов цифровой обработки изображений для автоматизированной оценки характеристик фокусирующих оптических систем. Основное внимание уделено формализации и реализации в MATLAB алгоритмов расчёта функции рассеяния точки (ФРТ) и функции концентрации энергии (ФКЭ) на основе анализа интенсивности пятна рассеяния. Проведены экспериментальные проверки алгоритмов на реальных изображениях оптических элементов — объектив и асферическое зеркало — с последующим сравнением полученных метрик с теоретическими кривыми Эйри. Результаты демонстрируют высокую точность и универсальность предложенных подходов при минимальном аппаратном наборе.

Ключевые слова: Функция Рассеяния Точки, Функция Концентрации Энергии, Автоматизированная система, Обработка изображения, MATLAB.

Введение

В современных условиях серийного и лабораторного производства оптических систем всё чаще требуется объективная цифровая оценка характеристик фокусирующих элементов. На первый план выходят численные методы обработки изображений, позволяющие автоматически получать количественные метрики качества.

Цифровая обработка изображений «пятна рассеяния» открывает возможности быстрого, автоматического и универсального контроля: на основе анализа пиксельных данных вычисляются функции рассеяния точки и концентрации энергии, извлекаются численные характеристики. Такой подход минимизирует вмешательство оператора и аппаратные требования, обеспечивая воспроизводимость и масштабируемость процедур контроля

качества. В данной работе используются Функция Рассеяния Точки и Функция Концентрации Энергии.

Теоретическая основа Функция Рассеяния Точки (ФРТ)

В идеальной дифракционно-ограниченной системе с круглой апертурой диаметра D теоретическая ФРТ описывается законом Эйри [1]:

$$I(r) = I_0 \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi Dr}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi Dr}{\lambda f}} \right]^2$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода, λ — длина волны, f — фокусное расстояние. Эта осесимметричная кривая с острым центральным максимумом и убывающими кольцами получается из решения Фраунгоферова дифракционного интеграла и задаёт эталонный профиль пятна рассеяния. Для сравнения теории и практики применяют метод радиального усреднения: двумерное распределение интенсивности свожу к одномерному профилю $I(r)$ путём усреднения по кольцам радиуса r .

В эксперименте ФРТ регистрируют камерой в фокальной плоскости: после вычитания темного кадра и нормировки снимка на суммарную энергию полученную карту $I_{exp}(x, y)$ усредняют по углу, формируя эмпирический профиль $I_{exp}(r)$. Центр пятна определяется либо по максимуму, либо как центроид интенсивности. Полученная кривая служит основой для сравнения с теоретическим паттерном Эйри и для последующего вычисления метрик качества.

Функция Концентрации Энергии

Теоретическая ФКЭ $EE_{Airy}(r)$ задаётся отношением накопленной внутри радиуса r энергии к полной [2] [3]:

$$EE_{Airy}(r) = \frac{\int_0^r 2\pi r' I(r') dr'}{\int_0^{r_{max}} 2\pi r' I(r') dr'}$$

где $I(r)$ берётся из Эйри-функции. Эта монотонно растущая кривая показывает, какая доля энергии сосредоточена внутри заданного круга (например, 83,8 % внутри первого темного кольца при $r = 1,22 \frac{\lambda f}{D}$).

В эксперименте ФКЭ вычисляют по эмпирической ФРТ: суммируют интенсивности всех пикселей внутри каждого диска радиуса r , нормируют на суммарную энергию пятна и строят зависимость

$$EE_{exp}(r) = \frac{\sum_{x^2+y^2 \leq r^2} I_{exp}(x, y)}{\sum I_{exp}(x, y)}$$

По этой кривой определяют характерные радиусы r_{50} , r_{80} , r_{90} и сравнивают их с теоретическими значениями для оценки фокусировки и степени аберраций.

Реализация программного модуля обработки изображения

Ниже на рисунке 1 приведена блок схема работы алгоритма:



Рис. 1 – Блок схема работы алгоритма

Алгоритм состоит из следующих этапов:

- Ввод изображения: выбор кадра, чтение из файла. Алгоритм принимает монохромное BMP-изображение, загружаемое в память MATLAB как двумерная матрица, где каждая ячейка соответствует интенсивности одного пиксел. Далее элементы матрицы приводятся к формату с плавающей точкой, что обеспечивает корректные арифметические операции при дальнейшей обработке.
- Нормализация изображения: приведение интенсивности к диапазону 0–100 % для исключения влияния абсолютных уровней яркости. Для унификации результатов на разных камерах и с учётом вариативности разрядности (8–12 bit) применяется линейная нормализация:

$$I_{norm} = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \times 100\%,$$

где I_{min} и I_{max} — минимальное и максимальное значения интенсивности в исходном кадре [4] [5].

- Фильтрация интенсивности: подавление фона двухрежимным подходом — либо по тёмному кадру, либо пороговым значением [6] [7] [8]. Повторная нормализация.

- Определение центра пятна: вычисление центра пятна либо как максимума интенсивности, либо по центру масс (моментам).

- Расчет ФРТ: усреднение интенсивности по радиальным зонам для получения эффективного профиля ФРТ, так же построение теоретического профиля ФРТ и расчет численных характеристик [1].

- Расчет ФКЭ: накопление энергии внутри концентрических колец вокруг центра. Расчет и построение экспериментального и теоретического профилей, так же расчет численных характеристик.

- Вывод данных: вывод графиков зависимостей и численных метрик.

Входные данные: черно-белое изображение пятна рассеяния (матрица интенсивностей) и параметры эксперимента: длина волны λ , фокусное расстояние f , диаметр апертуры D , размер пикселя p .

Экспериментальная проверка

Эксперимент 1: объектив камеры спутниковой фотосъемки

На рисунке 2 показано полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы.

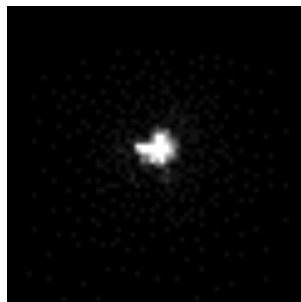


Рис. 2 – Полученное фото светящейся точки в фокусе исследуемой оптической системы

Для каждого эксперимента задаются базовые оптические характеристики системы. В первом эксперименте эти параметры имеют следующие значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	f	1100 мм
Диаметр апертуры	D	130 мм
Размер пикселя	p	5,5 мкм

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики:

Экспериментальная ФРТ (радиальный профиль интенсивности пятна) строится усреднением яркости пикселей в концентрических кольцах вокруг центра. Сравнение полученной кривой с идеальным профилем Эйри (теоретической ФРТ) представлено на рисунке 3.

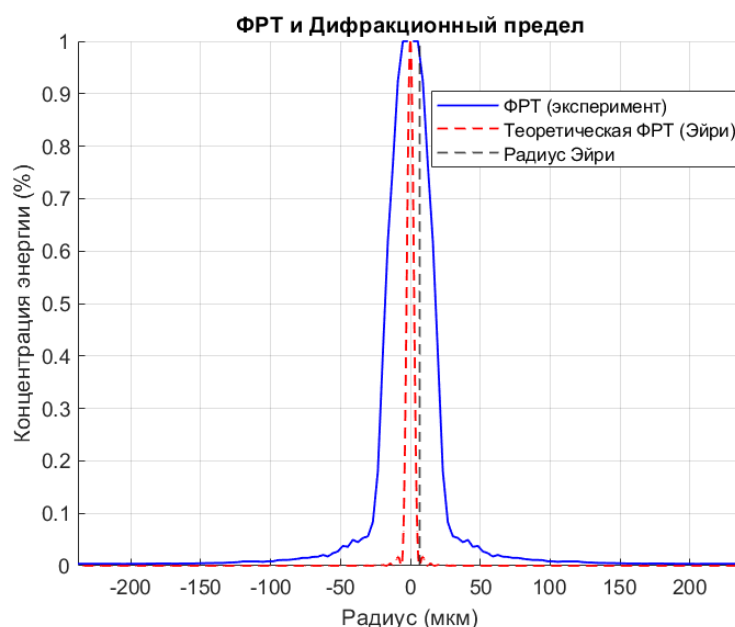


Рис. 3 – Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ
Численные оценки приведены в таблице 2:

Таблица 2 – Численные оценки

Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)

Эксперимент	36,14 мкм	22,11 мкм	1,31
Теория	35,75 мкм	13,21 мкм	4,20

Преувеличение ШПП в эксперименте ($\approx 1\%$) указывает на минимальное расфокусирование или слабые aberrации. Превышение экспериментального СРП по сравнению с идеальным свидетельствует о расширении пятна из-за aberrаций или микроскопических дефектов поверхности элементов, что снижает контраст и ухудшает детализацию. КПЛ показывает, насколько центральный пик доминирует над первым боковым лепестком. Низкое значение КПЛ в эксперименте указывает на выраженные боковые лепестки (более сильные, чем в идеале), что свидетельствует о нерезкости краёв главного пятна и потенциальном снижении контрастности.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики:

Далее на рисунке 4 представлена функция концентрации энергии (ФКЭ), на котором показаны экспериментальная и теоретическая кривые накопленной энергии $EE(r)$ в зависимости от радиуса.

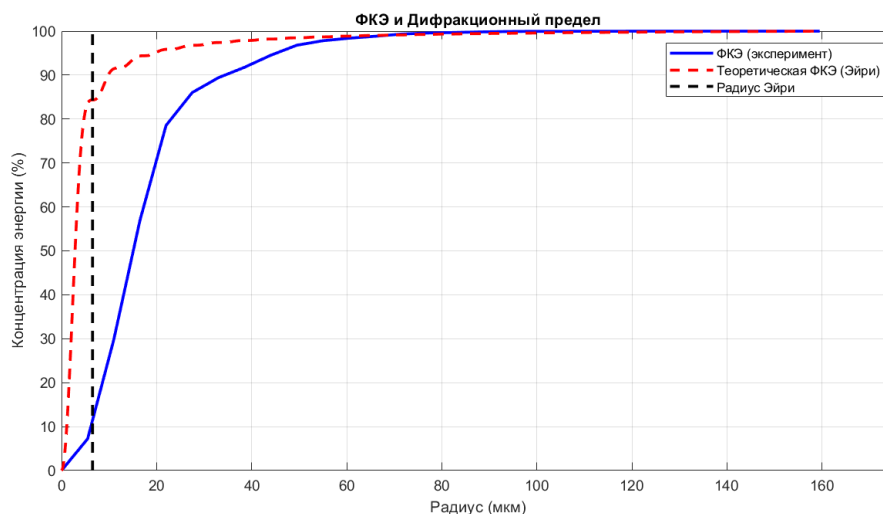


Рис. 4 – Экспериментальная и теоретическая ФКЭ
Численные оценки приведены в таблице 3:

Таблица 3 – Численные оценки

Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки перегиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны

Эксперимент	4,519 %/мкм при $r = 11,00$ мкм	от 11,00 до 126,50 мкм	0,182
Теория	24,760 %/мкм при $r = 2,24$ мкм	2,24 до 159,02 мкм	

Максимальный градиент профиля ФКЭ показывает скорость нарастания накопленной энергии по мере удаления от центра. Экспериментальный максимум на порядок ниже идеального, что указывает на гораздо более пологое нарастание энергии. Практически это означает, что край пятна «размыт», и большая часть энергии аккумулируется медленнее, чем в чисто дифракционном случае. В эксперименте зона смены режима накопления энергии сдвинута наружу и расширена, что указывает на появление и усиление боковых колец и артефактов, формируемых aberrациями. Расширенная область перегибов свидетельствует о нерезкой границе пятна и неоднородном распределении энергии. Точки перегиба отражают сложную структуру профиля (боковые кольца и вентиляльные эффекты). Нормированный коэффициент крутизны 0,182 означает, что скорость накопления энергии в реальной системе менее 20 % от теоретической, что подчёркивает влияние оптических дефектов.

Локальная крутизна на уровнях EE50, EE80, EE90:

Полученные значения представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм
50 %	4,454	23,411
80 %	2,325	7,453
90 %	0,508	2,021

В каждом «интервале» роста накопленной энергии система отстает от дифракционного предела, подтверждая наличие оптических дефектов или смещения фокуса. Градиенты на уровнях EE50/80/90 показывают локальное

изменение крутизны, позволяя выявлять зоны с наибольшими потерями фокусировки.

Эксперимент 2: асферическое зеркало (сегмент эллипсоида)

На рисунке 5 показано изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала.



Рис. 5 – Изображение светящегося пятна в фокусе асферического зеркала
Во втором эксперименте параметры приведены в таблице 5:

Таблица 5 – Параметры оптической системы для эксперимента

Параметр	Обозначение	Значение
Длина волны	λ	632 нм
Фокусное расстояние	f	600 мм
Диаметр апертуры	D	160 мм
Размер пикселя	p	5,5 мкм

Данный сегмент асферического зеркала эллипсоидной формы будет применён для фокусирования света, а не как элемент оптической системы для получения изображений.

Функция рассеяния точки (ФРТ) и её метрики:

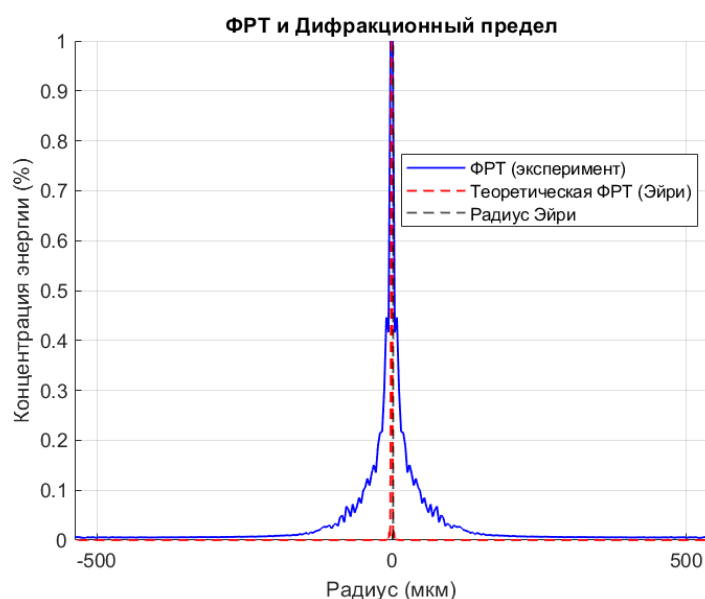


Рис. 6 – Зависимости экспериментальная и теоретическая ФРТ
 Численные оценки приведены в таблице 6:

Таблица 6 – Численные оценки

Параметр	Ширина на Полувысоте Пика (ШПП)	Среднеквадратичный Радиус Пятна (СРП)	Коэффициент пик-к-боковому лепестку (КПЛ)
Эксперимент	16,49 мкм	66,85 мкм	2,96
Теория	14,30 мкм	13,28 мкм	4,21

Увеличенное значение ШПП говорит о небольшом расширении главного пика из-за астигматизма или микронеровностей поверхности зеркала. Превосходство СРП экспериментальной величины указывает на «размазывание» пятна, обусловленное значительными aberrациями асферической поверхности. Пониженное значение КПЛ свидетельствует о заметных боковых лепестках, что снижает способность зеркала фокусировать свет и указывает на необходимость шлифовки для коррекции формы зеркала.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) и её метрики:

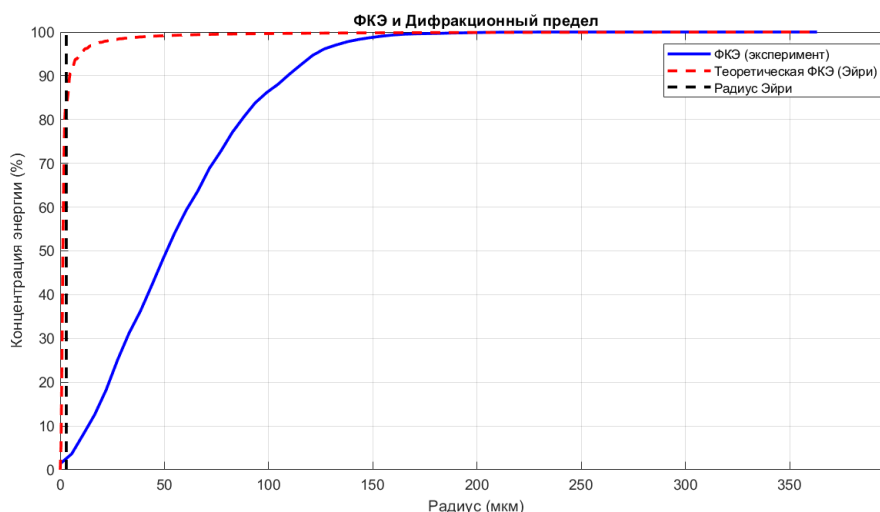


Рис. 7 – Экспериментальная и теоретическая ФКЭ
Численные оценки приведены в таблице 7:

Таблица 7 – Численные оценки

Параметр	Максимальный градиент dEE/dr	Точки перегиба ($d^2EE/dr^2 = 0$)	Нормированный коэффициент крутизны
Эксперимент	1,180 %/мкм при $r = 27,50$ мкм	от 22,00 мкм до 361,91 мкм	0,022
Теория	52,478 %/мкм при $r = 1,09$ мкм	от 0,73 мкм до 109,00 мкм	

Практически в 45 раз меньший экспериментальный градиент указывает на пологое накопление энергии в центральной области. Это характерно для систем с выраженными аберрациями или смещённым фокусом — энергия «растекается» дальше от центра, и пик накопления смещается наружу. Экспериментальная зона перегибов существенно расширена и смещена наружу. Это свидетельствует о множественных боковых кольцах и сложной структуре аберраций асферического зеркала, приводящих к неоднородному накоплению энергии. Реальная ФКЭ растёт на 2,2 % от идеальной скорости.

Локальная крутизна на уровнях EE50, EE80, EE90:

Полученные значения представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры оптической системы для эксперимента

Уровень EE	Эксперимент, %/мкм	Теория, %/мкм

50 %	1,062	48,341
80 %	0,631	15,374
90 %	0,403	3,198

Во всех трёх точках экспериментальные крутизны существенно ниже идеальных, что указывает на равномерное, но замедленное распределение энергии по радиусу.

Заключение

В работе показано, что цифровая обработка изображений «пятна рассеяния» с вычислением функции рассеяния точки и функции концентрации энергии представляет собой надёжный и обоснованный метод оценки качества фокусирующих оптических систем. Предложенный MATLAB-алгоритм обеспечивают полную автоматизацию анализа — от загрузки и нормализации кадров до построения радиальных профилей и вычисления метрик — что позволяет получить объективные и воспроизводимые результаты при минимальном наборе аппаратуры. Одновременно метод сохраняет высокую скорость обработки, но не чувствителен к локальным микродефектам.

В качестве направлений дальнейшего развития стоит отметить интеграцию анализа модуляционной передаточной функции для оценки контрастных структур и применение методов машинного обучения для автоматической классификации профилей ФРТ/ФКЭ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кирилловский, В. К., Точилина, Т. В. Оптические измерения. Часть 2–6. — СПб. : Университет ИТМО, 2016–2017.
2. ГОСТ Р 58566–2019. Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний. — Введ. 2020-09-01. — М. : Стандартинформ, 2019.

3. ГОСТ Р 70039–2022. Оптика и фотоника. Характеристики оптических систем. Термины и определения. – Введ. 2023-03-01. – М. : Стандартиформ, 2022.
4. How do I normalize the pixel value of an image to 0–1? [Электронный ресурс] // Stack Overflow. – URL: <https://stackoverflow.com/questions/70783357/how-do-i-normalize-the-pixel-value-of-an-image-to-01>
5. Data normalization [Электронный ресурс] // The Node. – URL: <https://thenode.biologists.com/data-normalization/research/>
6. Dark Frame Calibration [Электронный ресурс] // Diffraction Limited. – URL: https://cdn.diffractionlimited.com/help/maximdl/Dark_Frame_Calibration.htm
7. Capturing and Using Dark Frames [Электронный ресурс] // SharpCap. – URL: https://docs.sharpcap.co.uk/4.0/29_CapturingandUsingDarkFrames.htm
8. Why is there no image noise in my webcam dark frame photographs? [Электронный ресурс] // Stack Exchange. – URL: <https://photo.stackexchange.com/questions/56153/why-is-there-no-image-noise-in-my-webcam-dark-frame-photographs>
9. Full Width at Half Maximum (ШПМ) [Электронный ресурс] // GravMax. – URL: <http://www.gravmax.ru/spravochnik/546-full-width-at-half-maximum-ШПМ-spektralnaya-shirina.html>
10. Анализ пикового соответствия спектра комбинационного рассеяния [Электронный ресурс] // Nanophoton. – URL: <https://nanophoton.ru/tekhnika-analiza-analiz-pikovogo-sootvetstviya-spektra-kombinacziionnogo-rasseyaniya>
11. Моделирование оптических систем [Электронный ресурс] // Вестник приборостроения. – URL: <https://vestnikprib.bmstu.ru/articles/454/html/files/assets/basic-html/page4.html>

12. Среднее квадратическое [Электронный ресурс] // Wikipedia. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Среднее_квадратическое
13. Imaging Radar and Applications: Problem Set III Response [Электронный ресурс] // MIT CSAIL. – URL: <https://people.csail.mit.edu/halordain/Imaging%20Radar%20and%20Applications/Problem%20Set%20III%20Response.pdf>
14. Visual Object Tracking using Adaptive Correlation Filters [Электронный ресурс] // Colorado State University. – URL: https://www.cs.colostate.edu/~draper/papers/bolme_cvpr10.pdf